

摩擦抵抗低減を目指した乱流制御の研究動向

乱流とは流体中の微細な渦運動を伴う流れであり、航空機や船舶などが進むときに空気や水から受ける摩擦抵抗や流体騒音を増大させるという負の効果を発生させる半面、混合・熱伝達や燃焼を促進するという正の効果もある。この乱流を適切に制御して、負の効果を抑制し、正の効果を助長させるという乱流制御は、省エネルギーや製品の高品質化、環境悪化防止などに繋がり、輸送分野等においてブレークスルーをもたらす技術となりうる。

乱流の研究は古くから行われてきているが、その進展は比較的遅く、現在でも乱流を制御することは困難である。しかし、近年、乱流制御の研究が盛んに行われ、近未来技術の一つとなる可能性も出てきている。その背景には、スーパーコンピュータの能力向上と直接数値シミュレーション（DNS）技術の発達による乱流構造に関する基礎的知見の蓄積、乱流制御を実現するためのマイクロマシン技術の急速な発展がある。また、乱流制御により実現される省エネルギー・環境問題解決などへの期待が大きいことも挙げられる。

乱流の制御は種々の研究を含み、一つの組織では研究を発展させることが難しい状況にある。我が国は、乱流制御に必要な個々の要素技術である光学的センシングなどのモニタリング技術、センサ・アクチュエータ等のマイクロマシン技術、DNS 技術は世界的に高いレベルにあり、乱流制御を目的とした種々領域を含む組織的な研究を実施する素地は整っている。例えば、2000 年から 5 年間、文部科学省開放的融合研究制度を利用して、独立行政法人や大学が参加した「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」というテーマの研究が行われた。

欧米に先んじてこれらの研究成果を実用化するためには、壁乱流の制御ユニットを構成しているセンサ・アクチュエータ・コントローラの微小化・高精度化・省エネルギー化・低コスト化・長期安定性の確立及び大きな効果を生み出す制御アルゴリズムなどの研究開発をバックアップすることが必要である。乱流制御は、マイクロマシン技術や微細加工技術、制御アルゴリズムの開発・進展に関連することから、研究情報を積極的に発信し、量産技術を有する産業界との融合研究を進める必要もある。

摩擦抵抗低減を目指した 乱流制御の研究動向

池田 一壽
推進分野ユニット

1 はじめに

空気などの気体、あるいは水などの液体が物体表面に沿って流れるとき、低速の場合は秩序だった層状の流れ、つまり層流 (laminar flow) であるが、流れの大きさや速さがある程度以上になると、流れの中の微細な渦運動が減衰せずに発達し、次々と様々な形状の大きな渦を作る。これが乱流 (turbulent flow) であり、不規則運動、3次元渦運動、散逸性などの共通の特徴がある。乱流は、レイノルズ数^{注1)}が2,000程度で発生すると言われているが、実際には流れの状態や条件により異なる。図表1に層流から乱流に変化する状況を示す。

乱流は、航空機や船舶などが進むときに空気や水から受ける摩擦抵抗や流体騒音を増大させるという負の効果を発生させる半面、混合・熱伝達や燃焼を促進するという正の効果を発揮することもある。乱流を適切に制御して、負の効果を抑制し、正の効果を助長させることが乱流制御である。乱流制御は、省エネルギーや製品の高品質化、環境悪化防止などに繋がっており、輸送分野においてブレークスルーをもたらす技術となりうる。

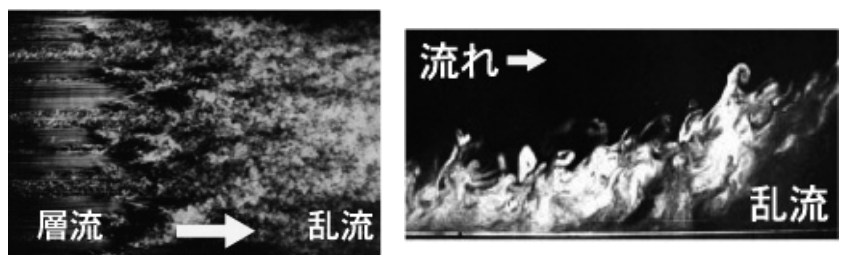
乱流の研究は古くから行われて

きているが、その進展は比較的遅いため、古くて新しい研究テーマと言える。近年、スーパーコンピュータの能力向上と乱流の直接数値シミュレーション (DNS)^{注2)}技術の発達による乱流構造に関する基礎的知見の蓄積が図られている。また、乱流制御を実現するためのマイクロマシン^{注3)}技術の急速な発展も見られる。省エネルギー・環境問題解決などへの期待が

大きいことから、乱流を積極的に制御しようとする研究が盛んに行われている。

本稿では、乱流の研究動向と、特に壁乱流の制御を実現するためにマイクロマシン技術を応用した乱流のマイクロ構造を検出するセンサ、乱流の微細構造を制御するアクチュエータをシステムとして構築し、摩擦抵抗低減を図る研究などについて紹介する。

図表1 層流から乱流への変化



知的乱流制御研究センターホームページから転載 (http://www.nmri.go.jp/turbulence/term_i/index.html)

用語説明

注1 レイノルズ数：流れを特徴づける長さスケール L 、速度 U 、流体の動粘性係数 ν により LU/ν と定義される無次元数。流体の持つ慣性力と粘性力の比を表す。

注2 直接数値シミュレーション (DNS)：計算機による数値シミュレーションで、基礎方程式について数値モデルを使うことなくに解くこと。乱流場をDNSで解く場合、渦の最小単位を捉えるほど計算格子を細かくする必要があるために、多大な計算機パワーが必要となる。(Direct Numerical Simulation)。

注3 マイクロマシン：数 μm ～数 mm のオーダーの大きさで、機能を発揮する微小な機械の総称 (MEMS、Micro Machine)。

2 乱流の研究動向

2 - 1

要素技術の研究動向

近代における乱流研究は、パイプ内の染料の軌跡が激しく乱れ始めることで層流から乱流へ遷移することを発見したオズボーン・レイノルズ（1842～1912）から始まり、110余年の歴史を経ている。

米国では、1970年代以後、まず、速く泳ぐサメの生体の仕組が研究された。サメは種類により鱗の表面性状が異なるが、速く泳ぐサメには各鱗の表面に微細な縦溝（リブレット）があり、溝の間隔は体の位置により異なるが35～100 μ mと小さく、このリブレットが最大8%の乱流摩擦抵抗を低減させていることが実験によって確認された¹⁾。1983年に、3M社はビニールシート表面に微細な縦溝を形成したリブレットフィルム（図表2）を開発し、オリンピック競技やアメリカン・カップ（ヨットレース）

で使用した。

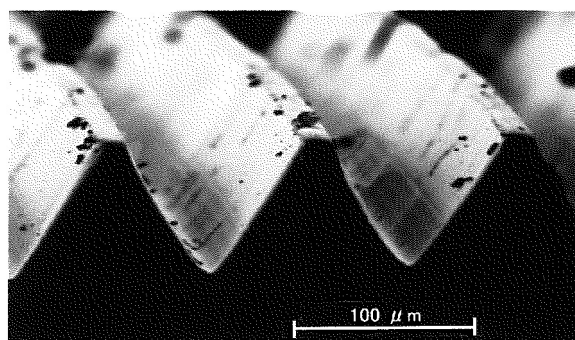
米国航空宇宙局（NASA）、軍関係、航空機産業界では、リブレットを応用したデバイスの実用化を目標に、制御理論・数値シミュレーション等幅広く研究がなされ、航空業界での実機テストでは全抵抗の2%低減を実証した。航空機の機体表面に2%の抵抗低減効果があるリブレットフィルムを用いた場合、エアバスA320の標準的な運航頻度で、5万 ℓ /年・機の燃料費が節減でき³⁾、米国航空業界全体で2億米ドルの節減がで

きると試算されている⁴⁾。しかし、この研究は、メンテナンスコストを考慮すると経済効果は小さく、実用化に至らなかった。

現在の米国では、主に大学で基礎的な乱流のメカニズム解明や、能動的な乱流制御の研究が行われている。例えば、2000年からは米国国防総省高等研究計画局（DARPA^①）のプロジェクトにおいて、ポリマー及びマイクロバブルによる船舶の摩擦抵抗低減の研究などが行われている。

現在は、むしろ欧州においてよ

図表2 3M社のリブレットフィルムの表面写真



参考文献²⁾より転載

図表3 「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」の研究実施状況

サブテーマ	研究目的	研究内容	担当機関
能動乱流制御に関する研究	(1) センサ、アクチュエータなどからなるマイクロマシン技術等の基盤技術を開発	能動乱流制御デバイスの開発	AIST、JAXA、NMRI、各大学
		能動乱流制御理論の構築	AIST、JAXA、各大学
	(2) 乱流を能動的に制御して摩擦抵抗低減・剥離・伝熱の制御システムを構築	乱流制御数値シミュレーション	JAXA、AIST、NMRI、各大学
		モデルシステムによる実証	AIST、JAXA、NMRI、各大学
乱流燃焼制御に関する研究	(1) 乱流燃焼現象の理解を深めつつセンシング技術を開発	乱流ジェットの制御の開発	JAXA、AIST、NMRI、各大学
	(2) 乱流ジェット等における燃焼ガスと空気の拡散・混合を制御促進し、希薄予混合燃焼 ^④ を安定化させその適用範囲を拡大し、燃焼効率の促進と有害ガスを低減	乱流燃焼計測技術の開発	JAXA、AIST
		乱流燃焼微細メカニズムの解明	JAXA、各大学
		モデルシステムによる評価	JAXA、AIST、NMRI、各大学

※ AIST（独 産業技術総合研究所）、JAXA（独 宇宙航空研究開発機構）、NMRI（独 海上技術安全研究所）

参考文献⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

り実用的な研究が行われているという傾向がある。海洋国オランダは船舶の摩擦抵抗低減の研究に歴史を持つ。また、欧州連合 (EU) 及び周辺地域の乱流燃焼関係の研究機関が結合した組織である「流れ・乱流及び燃焼に関する欧州研究共同体」(ERCOFTAC^②) の Special Interest Group においても、乱流制御の研究が積極的に行われている。

2004 年度に科学技術政策研究所が実施した「急速に発展しつつある研究領域調査」⁵⁾ において、近年、世界で急速に発展が見られる研究領域の 1 つとして「乱流の知的制御」に関する研究が急速に発展していることが示された。分析の結果、この領域には、壁乱流、乱流燃焼、数値シミュレーションなどの研究が含まれていた。残念ながら、この領域での日本の存在感はあまり見られない。日本でも乱流の基礎研究は、大学において 1950 年代後半から行われているが、日本語論文の場合、世界的に通用しないことも一因であると考えられる。

我が国では、乱流制御に必要なセンサ・アクチュエータ等のマイクロマシン技術、現象の解明・予測のための DNS 技術、光学的センシングによる乱流のモニタリ

ング技術など、乱流制御に必要な個々の要素技術が世界的に高いレベルにある。しかし、乱流の制御は種々の領域を含み、一つの組織では研究の発展が難しい。そこで 2000 年度からの 5 年間、文部科学省開放的融合研究制度を利用して、(独) 海上技術安全研究所に「知的乱流制御研究センター」を設置し、独立行政法人や大学のそれぞれのポテンシャルを持ち寄り「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」というテーマが融合研究として実施された (図表 3)。

ここでは制御手段として各種のセンサやアクチュエータを用い、発生メカニズムや制御理論を解明し、制御システムのプロトタイプを作製した。例えば、平成 17 年度乱流制御による新機能熱流体システムの創出の成果⁷⁾ では、「能動乱流制御」に関する研究において、実験室で乱流摩擦抵抗が約 $6 \pm 3\%$ 低減されている。マイクロバブルを用いた「壁乱流制御」では、渦スケールより大きな気泡の存在により乱れが抑制されるメカニズムを明らかにし、実船実験により局所的な摩擦抵抗が最大 60% 低減することが可能なことが実証されている。「乱流燃焼制御」に関する研究では、LES^{注 5)}

及び flamelet モデル^{注 6)} をもとにガスタービン燃焼器内の燃焼挙動の解析、および小型燃焼器を用いた燃焼制御の実験を行い、二次燃料噴射を用いた振動燃焼が解明された。これらは、実用化を図るための研究に着手すべき段階にある。

2 - 2

スーパーコンピュータの進展とシミュレーション

乱流は、不規則運動、3 次元渦運動、不規則性などの特徴があり、この強い非線形性を有するカオス的流体現象^{注 7)} が見られるため、従来、乱流を制御することが困難であった。1980 年代後半、スーパーコンピュータの能力向上に伴って DNS が可能になり、その計算データを 3 次元可視化することで乱流をコンピュータの中で再現し、その全体像を見ることが可能になった。

1990 年代には数多くの実験データ及びスーパーコンピュータを活用した数値シミュレーション (数値流体力学 (CFD^③)) の結果を用いて、乱流モデルの構築や熱流動現象の予測技術研究などが行われた。1990 年代初頭に流体力学問題における現代制御理論の数学的定式化がなされたため、この頃より乱流制御アルゴリズムの開発と検証が盛んに行われ、1990 年代後半からはこれらの知見に基づき人工物において乱流を積極的に制御する試みがなされるようになった。スーパーコンピュータの能力向上による理論と実験との整合状況を図表 4 に示す。

■ 用語説明 ■

注 4 希薄予混合燃焼：燃料ガスと空気を事前に希薄に混合させておいてから燃焼させる燃焼方式。

注 5 LES (Large Eddy Simulation)：大渦シミュレーション (DNS の近似解析モデル)。

注 6 flamelet モデル：レイノルズ数が大きいときには乱流中でも層流火炎がしわ状に変形すると見なすモデル。

注 7 カオス的流体現象：予測できない複雑かつ不規則な様子を示す現象。

注 8 準最適制御：摩擦抵抗と制御エネルギーの和で定義される評価関数を時々刻々最小化させる最適な制御分布を理論的に算出する方法。

図表4 スーパーコンピュータの能力向上による理論と実験との整合状況

年代	代表的 スーパーコンピュータ	理論と実験との整合状況	実施機関等
1980年代 後半	<ul style="list-style-type: none"> ● CrayXMP/2 (米国) ● SX2/SX3 (日本) ● DNS メモリ規模：10MB 	● 平行平板間乱流の DNS の詳細な計算結果を初めて報告。レイノルズ数 $Re_\tau = 180$ (壁面に沿う乱流の特徴が出る最低値に近い)。これまでの実験計測値による統計量と概ね一致。	Kim et al., 1987、米・NASA Ames 研／スタンフォード大
		● 粒子追跡速度計測法が開発され、壁面近くの領域における変動量など詳細部分の実験と DNS との定量的な一致を得る。	笠木、西野、1991 東大
1990年代	<ul style="list-style-type: none"> ● CrayYMP/C90 (米国) ● IBMSP1/SP2 (米国) ● SX-4/SX-5 (日本) ● SR-22000 (日本) ● VPP-500/NWT (日本) 	● レイノルズ数 $Re_\tau = 600$ 程度まででのチャネル乱流の DNS が試みられ、速度分布が対数則とべき乗則のどちらに従うかなどを調査したが、レイノルズ数が低いため結論が出なかった。	Moser et al., 1999、米・NSA Ames 研／スタンフォード大
		● 現代制御理論の流動制御問題への適用法が定式化。一以降、DNS を用いた乱流の摩擦抵抗低減の数値実験が活発化—	Abergel & Temam, 1990、パリ第11大
		● 比較的計算負荷の低い準最適制御 ⁸⁾ 及び乱流の準秩序構造に基づくより直感的な制御とも20%程度の摩擦抵抗低減を得る。	Choi et al., 1993 ; Lee et al., 1998、米・スタンフォード大 Choi et al., 1994、米・スタンフォード大
	● DNS メモリ規模：10MB ~ 10GB	● 壁面において実測できる物理量やアクチュエータの変形を考慮した、よりハードウェアシステムを意識した条件下で DNS を用いた摩擦抵抗低減の数値実験により、離散的にセンサ、アクチュエータを配置した場合でも一定の抵抗低減効果が得られることを確認。	遠藤 et al., 2000、東大
2000年代 前半	<ul style="list-style-type: none"> ● SX-6/SX-7/地球シミュレータ (日本) ● SR8000/11000 (日本) ● ASCIWhite (米国) ● Intel アーキテクチャベースの Linux クラスタ／グリッド (世界中) ● DNS メモリ規模：10GB ~ 1TB 	● レイノルズ数 $Re_\tau = 1000 \sim 2000$ でのチャネル乱流の DNS が試みられる。	Del Alamo et al., 2004、スペイン・マドリッド工科大 岩本 et al., 2005、東大
		● フィードバック制御システムを用いた6%の摩擦抵抗低減を風洞実験により実証 (吉野 et al., 2005、東大)。	
		● 準最適制御理論 (深淵、笠木、2004、東大) と同様の機構で抵抗が減少していることの傍証は得られている (吉野ら、2006、東大) が、未だ十分な検証には至っていない。	
		● 低レイノルズ数 $Re_\tau = 100$ での乱流で非常に計算負荷の高い最適制御理論を用いた平行平板間乱流の制御の DNS について報告。フィードバック制御により、乱流が層流化することが示された (Bewley et al., 2001、米・UC San Diego)。	

参考資料⁸⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

3 日本の最近の研究成果

3-1

壁乱流の発生及び制御メカニズム

流れ方向に発生したいわゆる縦渦は無数に存在し、これにより乱流摩擦抵抗の原因となるレイノルズせん断応力の生成が行われる。図表5は流れに垂直な断面での壁面近傍の縦渦と、瞬時のレイノルズせん断応力の生成・消滅・拡散過程の空間的位置関係⁹⁾を示している。

縦渦の中心に対応する局所的に低圧な領域の核の部分(L)があり、渦の右側の領域(スウィープ側)

では、壁面に流体が衝突するため局所的に高圧となる。逆に渦の左側(イジェクション側)では、低速の流体がもち上げられ、上流から対流により供給される高速流体と衝突することにより高圧のよどみ領域(高圧ポット)が形成される。レイノルズせん断応力の生成は渦の両側で活発に行われ、生成されたレイノルズせん断応力は乱流拡散(Turbulent Diffusion)や圧力拡散(Pressure Diffusion)によって周囲に輸送され、輸送されたレイノルズせん断応力は、圧力・歪相関が高い、低圧及び高圧領域で消滅が起こる。このような一連の生成・拡散・消滅のプロセスが

絶えず起こることで、乱流そのものが維持されている。

このように、摩擦抵抗の成因となる構造は空間的、時間的に間欠的なものであり、実際の適用対象物における縦渦の時空間スケールが即ちセンサ及びアクチュエータに求められる寸法・応答時間¹⁰⁾になる。図表6のように、それらの寸法は0.001~10mm、応答時間は0.01~100ms程度であり、壁乱流の取り扱う時空間スケールは、従来の機械システム技術が扱ってきた系に比べて小さい。近年急速に発達したマイクロマシン技術は、選択的に縦渦を操作することにより、効果的にレイノルズせ

ん断応力、乱流運動エネルギーの生成を抑制し、壁面摩擦抵抗を低減することができる可能性をもっている。

3 - 2

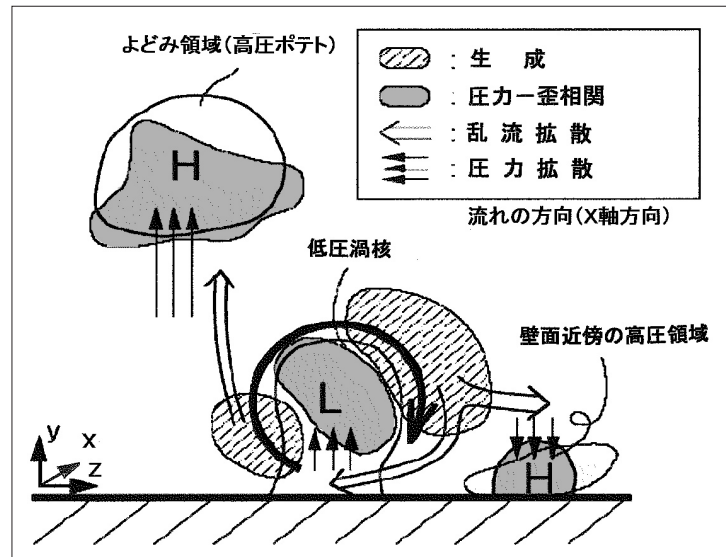
センサ及びアクチュエータを用いた壁乱流制御

壁面上を流れる縦渦をセンサで得た位置情報に応じて、アクチュエータが縦渦の回転運動を打ち消すように外力を加えることにより、縦渦運動が弱められる。これにより摩擦抵抗や騒音の低減などの効果が得られる。コントローラと組み合わせたフィードバック制御システムの概念図を図表7に示す。

乱流制御に用いるアルゴリズム、センサ、アクチュエータなどの要素技術の研究は多いが、それらをシステムとして構築した研究例はまだ少ない。ブラウン大学(米国)のグループでは、3組の熱膜せん断応力センサ、圧電素子を用いた片持ち梁型アクチュエータとコントローラを組み合わせた制御システムを構築した¹¹⁾。また、米国のTsaoらは、熱膜せん断応力センサ、フラップ型電磁アクチュエータ、駆動回路を統合した高度な制御チップを試作して摩擦抵抗低減を試みた¹²⁾。しかし、これらの研究は、実現するシステムの構築には至らなかった。

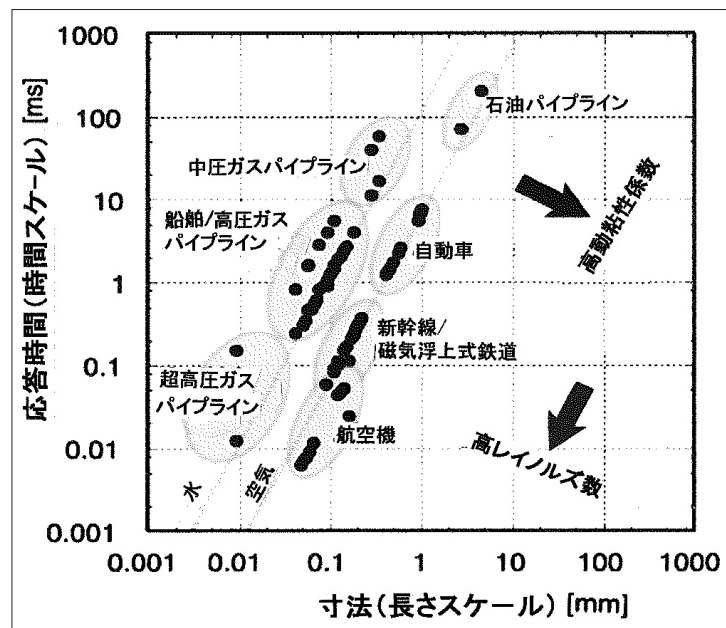
東京大学の笠木伸英教授らは、図表8のように、192個のマイクロせん断センサと48個の電磁式アクチュエータ、コントローラからなる乱流制御システムのプロトタイプを開発した。1列のセンサ群は48個のセンサが1mmピッチで4列、また1列のアクチュエータ群は16個のアクチュエータが3mmピッチで3列配列してある。使用されたセンサとアクチュエータの微小化寸法は1mmと2.4mm、応答時間はセンサ及びア

図表5 壁面近傍の縦渦と、瞬時のレイノルズせん断応力の生成・消滅・拡散過程の空間的位置関係



参考文献⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて一部改変

図表6 縦渦制御のために求められるセンサ及びアクチュエータの仕様



参考文献¹⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて一部改変

用語説明

注9 低速ストリーク運動: 壁に沿う乱流は壁面の近傍に縞状に周囲流体よりも低速の部分（低速ストリーク）が現れる。これが渦やせん断との相互作用で不安定化し、運動運動をすることをいう。

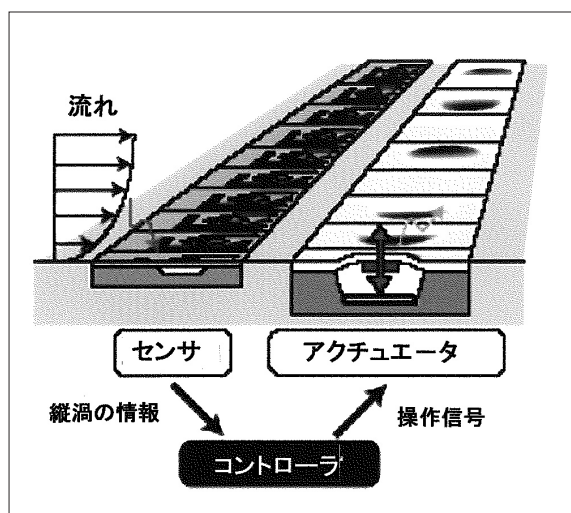
注10 乱流構造規範型制御: 乱流の発生メカニズムの知識に基づいた制御方法。

注11 遺伝的アルゴリズム(GA): 進化論的手法を用いた最適解探索アルゴリズム (Genetic Algorithm)。

クチュエータとも約0.1msのオーダーであり、アクチュエータの膜の変位量は約50 μ mである。

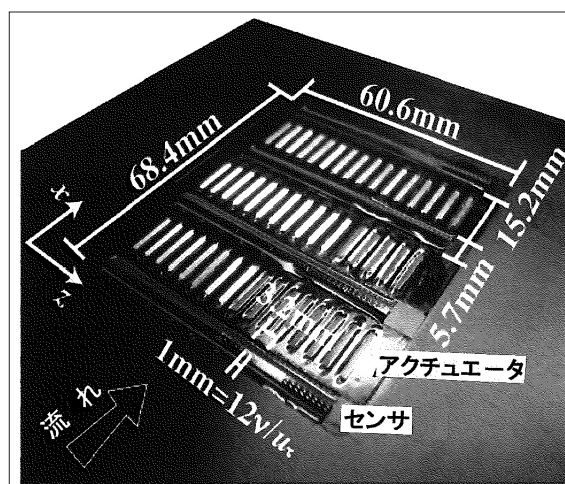
このシステムを模した系で低速ストリーク運動^{注9)}を制御する乱流構造規範型制御^{注10)}を適用したDNSではストリークの安定化が起こり、約12%の低減効果が得られた¹³⁾。また実際の風洞実験において抵抗低減効果の検証をした結果、遺伝的アルゴリズム(GA)^{注11)}による最適制御を用いた場合、最

図表7 壁乱流フィードバック制御システムの概念図



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて一部改変

図表8 壁乱流のフィードバック制御ユニット



参考文献¹⁴⁾を基に科学技術動向研究センターにて一部改変

大11%の抵抗低減効果があり、せん断応力計測の不確かさを考慮すると6%の抵抗低減が得られたことに相当する¹⁴⁾。このような大規模なフィードバック制御システムを用いた実験によって摩擦抵抗低減効果を確認したのは世界で初めてであり、この成果は実用化に向けての大きな一歩であると言える。

実験に用いたセンサ及びアクチュエータ寸法を図表6にあってはめると、石油パイプラインの縦渦制御などに適用できることがわかる。一方、新幹線、航空機、超高压ガスパイプラインなどの縦渦を制御するためには、センサ及びアクチュエータに求められる仕様は、寸法が0.001～0.1mm、応

答速度が0.01ms程度必要であり、更なる微小化とともに、高精度化の研究が必要である。

しかし、乱流制御はまだ、実験室実験の基礎研究段階であり、実用化段階にステップアップするには、ハードウェア側では、センサ・アクチュエータを適用対象物の縦渦の長さスケールに合う微小化、高精度化、省エネルギー化、低コスト化、耐久性化、ダスト等の汚れに対する長期安定性が求められる。また、微細加工技術の進展と印刷や型押しなど安価な製作技術の応用による量産技術の確立も必要である。ソフトウェア側では、データ処理量を軽減し、飛躍的に大きな効果を発揮できる制御アル

ゴリズムの開発が必要である。これらの段階の技術開発・進展は、産業界の技術進歩に依存するところも大きい。各技術を有する産業界との融合研究を促すために、産業界などに積極的に情報発信することが実用化の促進に繋がる。

この乱流制御システムのハード、ソフトウェア側の課題解決及び開発がなされることにより、特に高速度を追求する分野、例えば磁気浮上式鉄道、新幹線、飛行機などの輸送分野での活用が期待されている。日本で行われている研究については、米国や欧州において類似の研究が活発化しており、欧米に研究の実用化を先取りされない方策が必要である。

4 まとめ

乱流制御は、流体抵抗低減及び燃焼や熱・物質輸送の改善を実現し、エネルギー・環境問題等の解決を図る鍵の1つであり、輸送分野等においてブレークスルーをもたらす技術となりうる。

現在では、スーパーコンピュータや最近の制御理論、制御ハードウェア、CFDの発達により、時々刻々の流れの状態に応じて乱流現象をフィードバック的に制御しよ

うとする研究が盛んに行われている。従来は解析解が存在せず実現不可能と見なされていたが、乱流制御は今後、実現性の高い近未来技術の一つとなる可能性がある。特に、壁乱流の制御ユニットを構成しているセンサ・アクチュエータ・コントローラの微小化においては、日本で大きな成果が上がっている。これらについては更に、高精度化・省エネルギー化・低コ

スト化・長期安定性の確立及び大きな効果を生み出す制御アルゴリズムの研究開発をバックアップすることやマイクロマシン技術、微細加工技術のシスマティックな研究が必要である。

乱流制御は種々の研究を含み1つの組織において解決することは困難なことから、広く国内のトップクラス研究者による研究を継続することが望ましい。また、それ

らの量産技術を有する産業界との融合研究も進める必要がある。そのためには、乱流制御研究の情報を産業界に積極的に発信することが求められる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、東京大学大学院工学系研究科の笠木伸英教授、深潟康二助手、独立行政法人海上技術安全研究所の児玉良明流体部門長、春海一佳副研究部門長、(株)山武の上運天昭司氏らに討議や資料提供などで多大な協力をいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

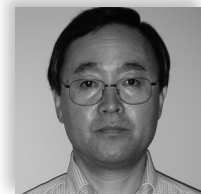
参考文献

- Walsh, M. J., "Riblets," in Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, Bushnell, D. M., and Hefner, J. N., eds., Prog. Astronautics Aeronautics, 123, AIAA, (1990), pp. 203 - 261
- 鈴木雄二、笠木伸英：乱流の知的能動制御、システム／制御／情報、4 (2004) 131 - 137
- MBB Transport Aircraft Group, "Microscopic rib profiles will increase aircraft economy in flight," Aircraft Engineering, Vol. 60, No. 1, p. 11 (1988)
- DeMeis, R., "Stick-to-it riblets," Aerospace America, January (1988), p. 14
- 急速に発展しつつある研究領域調査、NISTEP REPORT No. 95、科学技術政策研究所、2005年5月
- (独)宇宙航空研究開発機構、(独)産業技術総合研究所、(独)海上技術安全研究所：平成16年度科学技術振興調整費「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」実施計画書、(2004)
- 文部科学省科学技術・学術政策局科学技術振興室：平成17年度科学技術振興調整費による実施課題等の評価結果について、2005年12月27日
- 笠木伸英、深潟康二：資料（スーパーコンピュータ能力向上による壁乱流の理論と実験の整合状況）、2006年6月
- Kasagi, N., Sumitani, Y., Suzuki, Y., & Iida, O. : Kinematics of the quasi-coherent vortical structure in near-wall turbulence, Int. J. Heat Fluid Flow, 16 (1995) 2 - 10
- 笠木伸英、鈴木雄二、深潟康二：乱流の制御、パリティ、18:2(2003) 20 - 26
- Rathnasingham, R., and Breuer, K. S., "System modification and control of a turbulent boundary layer," Phys. Fluids, 9, (1997), pp. 1867 - 1869
- Tsao, T., Jiang, F., Miller, R. A., Tai, Y. C., Gupta, B., Goodman, R., Tung, S., and Ho, C. - M., "An integrated MEMS system for turbulent boundary layer control," Tech. Digest, Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97), Chicago, Vol. 1, (1997), pp. 315 - 317
- Endo, T., Kasagi, N., & Suzuki, Y. : Feedback control of wall turbulence with wall deformation, Int. J. Heat Fluid Flow, 21 (2000) 568 - 575.
- Suzuki, Y., Yoshino, T., Yamagami, T. & Kasagi, N. : GA-based feedback control system for drag reduction in turbulent channel flow, Proc. 4th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena (2005) 301 - 306

■ 略語のフルスペル ■

- DARPA** : Defense Advanced Research Projects Agency 「米国国防総省高等研究計画局」
- ERCOTAC** : European Research Community on Flow, Turbulence And Combustion 「流れ・乱流及び燃焼に関する欧州研究共同体」
- CFD** : Computational Fluid Dynamics 「数値流体力学」

執 筆 者



推進分野ユニット

池田 一壽

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>



国土交通省にて東京外かく環状道路の調査・設計、国道の維持・管理などに従事。現在、第3期科学技術基本計画における「社会基盤分野」の調査・研究を担当。技術士（総合技術監理部門、建設部門）。